地学前缘
EARTH SCIENCE FRONTIERS

全球 5.0 级以上地震活动与地球自转变化的 Granger 因果关系检验

杨国安[1]， 石 俊[2]

1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011
2. 中国科学院 国家天文台 乌鲁木齐天文站，新疆 乌鲁木齐 830011

Yang Guo'an[1]， Shi Jun[2]

1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Ürümqi* 830011, *China*
2. *National Astronomical Observatories/Urumqi Observatory*, *Chinese Academy of Sciences*, *Ürümqi* 830011, *China*

Yang Guo'an, Shi Jun. Testing for the Granger causality of the changes of the Earth's rotation and global earthquakes of magnitude above 5.0. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2): 378-383

Abstract: Using the Length of the Day from the EOP C04 data provided by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), and the time series data of the earthquakes whose magnitudes are 5.0 or more than 5.0 from 1973 to 2008 provided by the National Earthquake Information Center (NEIC), this paper gives an analysis of the Granger causality between the changes of the Earth's rotation and the global earthquakes. Granger causality tests show that there is indeed a two-directional causal relationship between the changes of the Earth rotation and the earthquakes: one direction is that the changes of the Earth's rotation may trigger the earthquakes, and the other is that the earthquake may induce the changes of the Earth's rotation. This testing result implies that there probably exists a much complex excitation mechanism between the Earth's rotation and the earthquakes.

Key words: Earth rotation; earthquake; Granger causality

摘 要:采用国际地球自转服务中心(IERS)发布的日长变化(Length of the Day, LOD)数据和美国国家地震信息中心(NEIC)公布的地震目录中的震级在 5.0 级(含 5.0 级)以上的地震数据,对 1973 年以来的每日地球自转变化时间序列与地震时间序列之间的 Granger 因果关系进行检验,结果表明:地球自转变化与地震之间存在着双向 Granger 因果关系,即地球自转变化可能导致地震发生,地震也会对地球自转变化产生影响,检验结果暗示了两者之间可能存在着复杂的动力机制。

关键词:地球自转;地震;Granger 因果检验
中图分类号:P315.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2321(2009)02-0378-06

地球自转变化有长期减慢、周期性变化和不规则变化三种趋势[1]。研究地球自转与地震的关系非常重要。Newcomb 首先在 1876 年就预见到地球自转的不均匀性及其与地震的关系,之后很多学者就地球自转不规则变化与地震的关系进行了大量研究,分别从不同的时间尺度、空间尺度探讨了自转变

收稿日期:2008-09-05;**修回日期**:2008-11-05
基金项目:国家自然科学基金项目(10873026)
作者简介:杨国安(1969—),男,博士,副研究员,主要从事气象、地震和区域发展的研究。E-mail: yangga@igsnrr.ac.cn

化可能触发地震，地震也可能引起地球自转变化，认为地球自转角速度的变化带来的角动量的变化可能是触发地震的诱因，而地震波可能对地球自转变化产生影响[1-14]。但由于问题的复杂性，无论是对于地球自转变化的起因，还是它与地震的关系还远没有彻底解决，仍然吸引着众多学者关注[15-16]。如最近有报道指出 2004 年 12 月 26 日的印度洋地震对地球自转起到了加速作用[17]，但也有研究指出该地震理论上的加速作用在观测上并没有得到足够的证据[18]；还有研究表明，地幔最深层处矿物的导电性能远高于下层地幔的其他部分，可能是使地球自转速度发生周期性变化的重要原因[19]。不同认识之间的争论固然存在，但至少说明对地球自转变化和地震活动之间的关系进行检验至今仍有重要意义。Granger 因果关系检验法在时间序列因果关系检验方面有很多优点[20]，已经被广泛地应用到气候变化[21]、地震预警、股市分析和网络安全等不同研究领域中[22-23]。

本文将采用 Granger 因果关系检验法，对 1973 年以来的地球自转变化和在此期间发生的 5.0 级以上地震之间的因果关系进行检验。

1　方法与数据

Granger 因果检验最早由 Granger 提出[20]，其模型表述如下[24]：

$$Y_t = \alpha + \sum_{i=1}^{m} \beta_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^{n} \gamma_j X_{t-j} + \mu_t \qquad (1)$$

式(1)中：X_t、Y_t 分别是变量和的时间序列；t 表示时间；Y_{t-j} 为 Y_t 的滞后值，m 为 Y_t 的最长滞后期；α 是常数；X_{t-j} 为 X_t 的滞后值，n 为 X_t 的最长滞后期；β_i 和 γ_j 为回归系数；μ_t 为随机误差。零假设 $H_0: \gamma_j = 0\ (j=0,1,\cdots,n)$。若零假设成立，意味着变量 X 不是变量 Y 的 Granger 原因，则有：

$$Y_t = \alpha + \sum_{i=1}^{m} \beta_i Y_{t-i} + \mu_t \qquad (2)$$

检验统计量：

$$F = \frac{(\mathrm{SSE}_2 - \mathrm{SSE}_1)/n}{\mathrm{SSE}_1/(T-m-n-1)} \qquad (3)$$

其中，F 为统计量，是服从自由度为$(n, T-m-n-1)$的 F 分布；SSE_1 为式(1)的残差平方和；SSE_2 为式(2)的残差平方，m、n 分别为 Y 和 X 的滞后阶数，T 为样本数量。

进行 Granger 因果关系检验，首先要对时间序列的平稳性进行检验。模型要求系统中的变量是平稳序列，在数据为非稳定的条件下，将使模型的统计推断失效，分析时会出现“伪回归”现象。常见的非平稳时间过程就是单位根过程。检验变量是否稳定的过程称为单位根检验(Unit Root Test)。平稳序列将围绕一个均值波动，并有向其靠拢的趋势，而非平稳过程则不具有这个性质。单位根检验主要有 DF(Dickey-Fuller Test)检验、ADF(Augmented Dickey-Fuller Test)检验和 PP(Phillips-Perron Test)检验，本文采取较常用的 ADF 单位根检验方法。

地球自转变化的数据源自国际地球自转服务中心(IERS)的地球定向参数，采用的是每天日长变化 LOD (Length of the Day)时间序列；以 1973 年 7 月 1 日—2008 年 7 月 25 日的逐日地球自转变化为样本，共有 12 987 d 的数据。LOD 增加时地球自转的速率减小，反之则表示地球自转速度增加。逐日地震数据来自美国国家地震信息中心(NEIC)公布的地震目录，1973 年以来的全球共发生震级在 5.0 级以上(含 5.0 级)的地震 56 867 次；其中，震源深度在 70～700 km 的中源、深源地震次数为 12 779 次；6.0 级以上(含 6.0 级)的地震 4 886 次；7.0 级以上(含 7.0 级)的地震 541 次；8.0 级以上(含 8.0 级)的地震 39 次；最大的地震是 2004 年 12 月 26 日发生在印度尼西亚海域的 9.0 级地震，引发了近 200 a 以来世界发生的最强烈地震海啸，浪高达到 10～12 m，波及东南亚、南亚和东非地区 10 多个国家，致使 30 多万人罹难[25]。

季节性变化是地球自转变化中最为显著的周期性分量。根据长期的天文观测，地球自转变化对日长的季节性影响可用下式表示[1,6]：

$$\Delta P(s) = 0.000\,43 \cos \frac{2\pi}{365}(t+336) + \cos \frac{4\pi}{365}(t+66) \qquad (4)$$

式(4)中，t 为从年初起算的天数，$\Delta P(s)$为日长的变化量。根据该公式，文献[6]归纳总结出 1 年之中 1 月 10 日—2 月 10 日、3 月 22 日—4 月 22 日、7—8 月、11 月共计 5 个月份为日长季节性速率的转变月份，其他时期为 7 个月份。

2 结果分析

按照文献[6]的划分方法,对 1973 年来发生的 5.0 级及以上的地震进行统计分析,发现发生在季节性速率转变月份的次数为 24 300 次,占全部地震数量的 42.73%,其他月份的发震次数 32 567 次,占 57.27%;统计得到日长季节性速率转变的月份数为 179 个,处于非转变的月份数为 249 个;统计得到日长季节性速率的转变月份的天数有 5 549 d,处于非转变月份的天数为 7 441 d。采用 X^2 统计量对地震和自转之间的独立性进行检验,首先对全球地震活动发生频次与以月为单位的日长季节性变化频次进行检验得到 $X^2=0.143$,再对全球地震活动发生频次与以天为单位的日长季节性变化频次检验得到 $X^2=0.001$。查 X^2 分布表得 $X^2_{1-0.01}(1\times1)=6.64$。检验值都小于 6.64,根据列联表的独立性检验法则,在 $a=0.01$ 置信水平上都无法拒绝零假设,说明两者具有相对独立性。

对地球自转速度变化时间序列与地震频次、地震能量时间序列进行相关分析,得到每日地球自转变化时间序列与地震频次时间序列之间的相关系数为−0.016,与地震释放能量时间序列之间的相关系数为−0.019。从相关系数来看,地震与地球自转之间的相关性很弱。为了揭示地球自转与地震之间的关系,采用 Granger 因果关系检验方法进行检验。首先进行 ADF 检验,若 ADF 绝对值大于临界值的绝对值,则拒绝零假设,说明变量是平稳的,不存在单位根;若 ADF 的绝对值小于临界值的绝对值,则接受零假设,说明变量是不平稳的,存在单位根。根据检验结果,日长变化、地震频次、地震能量在滞后期为 2、50 和 365 时在临界值为 1%或 5%的情况下均为平稳时间序列(表 1),可以进行进一步的 Granger 因果关系检验。

日长季节性变化的小波分析表明,地球自转变化存在着时间跨度为 175~190 d 的半年周期项和 350~375 d 的周年项[26],还存在着 50 d、95 d、120 d 周期[27-28]。因此,分别选择 50、95、120、180、365 为滞后期检验地球自转变化与地震的 Granger 因果关系。采用 Granger 因果检验法对两个变量是否有内在的因果关系进行检验。检验结果见表 2、表 3。经过检验发现,在不同周期为滞后期的情况下,无论是地球自转变化时间序列与以日发生频次表征的地震时间序列之间,还是地球自转变化时间与以能量表征的地震时间序列之间,所有的 F 统计量的显著性水平都达到或接近 5%,说明两者之间存在着双向 Granger 因果关系。扣除了季节性的周期项的日长变化和地震频率的 Granger 因果检验结果显示了与没有做扣除处理相似的结果(表 4、表 5),即日长不规则变化时间序列与地震时间序列之间也存在双向 Granger 因果关系。

表 1 地球自转和地震时间序列单位根检验结果

Table 1 The unit root test result of the Earth rotation and earthquake time series

变量	模型形式(c,t,k)	ADF 统计值	1%临界值	5%临界值	10%临界值	结论
LOD	(C,0,2)	−7.922 832	−3.434 1	−2.862 3	−2.567 2	平稳
	(C,0,50)	−4.697 071	−3.434 1	−2.862 3	−2.567 2	平稳
	(0,0,365)	−2.342 064	−2.566 0	−1.939 3	−1.615 6	平稳
Earthquake	(C,0,2)	−51.138 95	−3.434 1	−2.862 3	−2.567 2	平稳
	(C,0,50)	−10.879 98	−3.434 1	−2.862 3	−2.567 2	平稳
	(C,0,365)	−3.483 456	−3.434 1	−2.862 3	−2.567 2	平稳
LOD1	(0,0,2)	−4.525 768	−2.566 0	−1.939 3	−1.615 6	平稳
	(C,0,50)	−3.946 405	−2.566 0	−1.939 3	−1.615 6	平稳
	(C,0,365)	−1.775 933	−2.566 0	−1.939 3	−1.615 6	非平稳
Energy	(C,0,2)	−63.962 95	−3.434 1	−2.862 3	−2.567 2	平稳
	(C,0,50)	−16.073 62	−3.434 1	−2.862 3	−2.567 2	平稳
	(C,0,365)	−5.797 788	−3.434 1	−2.862 3	−2.567 2	平稳

注:①检验模型形式中的 c 和 t 表示带有常数项和趋势项,k 表示滞后阶数。②LOD 表示日长变化时间序列;LOD1 表示扣除了季节性的周期项的日长变化,参照公式(4)对季节性的变化进行扣除;Earthquake 表示全球每日地震频次时间序列;Energy 表示每日地震能量时间序列,地震能量的换算按照公式 $\lg E=11.8+1.5M_s$ 计算,其中 E 为地震能量,M_s 为震级,能量 E 的单位为 10^{-7}J。③下文中的 LOD、LOD1、Earthquake 和 Energy 含义相同。

表 2　日长变化和地震频次的 Granger 因果检验结果

Table 2　The Granger causality test result of the LOD change and earthquake frequency

零假设	观测数/滞后期数	F 统计量	概率
LOD does not Granger Cause EARTHQUAKE	12 937/50	1.495 95	0.013 31
EARTHQUAKE does not Granger Cause LOD	12 937/50	1.536 98	0.008 84
LOD does not Granger Cause EARTHQUAKE	12 892/95	1.231 34	0.063 46
EARTHQUAKE does not Granger Cause LOD	12 892/95	1.391 90	0.007 20
LOD does not Granger Cause EARTHQUAKE	12 867/120	1.201 51	0.066 71
EARTHQUAKE does not Granger Cause LOD	12 867/120	1.462 19	0.000 78
LOD does not Granger Cause EARTHQUAKE	12 807/180	1.247 27	0.014 19
EARTHQUAKE does not Granger Cause LOD	12 807/180	1.350 72	0.001 31
LOD does not Granger Cause EARTHQUAKE	12 622/365	1.265 48	0.000 53
EARTHQUAKE does not Granger Cause LOD	12 622/365	1.260 48	0.000 64

表 3　日长变化和地震能量的 Granger 因果检验结果

Table 3　The Granger causality test result of the LOD change and earthquake energy

零假设	观测数/滞后期数	F 统计量	概率
LOD does not Granger Cause ENERGY	12 937/50	2.604 34	5.1E−09
ENERGY does not Granger Cause LOD	12 937/50	1.783 00	0.000 57
LOD does not Granger Cause ENERGY	12 892/95	2.378 73	1.6E−12
ENERGY does not Granger Cause LOD	12 892/95	1.850 03	1.1E−06
LOD does not Granger Cause ENERGY	12 867/120	2.782 40	0.000 00
ENERGY does not Granger Cause LOD	12 867/120	1.945 40	3.5E−09
LOD does not Granger Cause ENERGY	12 807/180	2.361 24	0.000 00
ENERGY does not Granger Cause LOD	12 807/180	1.687 84	3.0E−08
LOD does not Granger Cause ENERGY	12 622/365	2.293 19	0.000 00
ENERGY does not Granger Cause LOD	12 622/365	1.817 74	0.000 00

表 4　扣除季节性的周期项的日长变化和地震频率的 Granger 因果检验结果

Table 4　The Granger causality test result of the LOD change (seasonal change deduction) and earthquake frequency

零假设	观测数/滞后期数	F 统计量	概率
LOD1 does not Granger Cause EARTHQUAKE	12 937/50	1.460 79	0.018 70
EARTHQUAKE does not Granger Cause LOD1	12 937/50	1.535 55	0.008 97
LOD1 does not Granger Cause EARTHQUAKE	12 892/95	1.212 76	0.078 56
EARTHQUAKE does not Granger Cause LOD1	12 892/95	1.379 45	0.008 70
LOD1 does not Granger Cause EARTHQUAKE	12 867/120	1.187 81	0.079 71
EARTHQUAKE does not Granger Cause LOD1	12 867/120	1.449 71	0.001 01
LOD1 does not Granger Cause EARTHQUAKE	12 807/180	1.227 72	0.021 06
EARTHQUAKE does not Granger Cause LOD1	12 807/180	1.346 35	0.001 46
LOD1 does not Granger Cause EARTHQUAKE	12 622/365	1.262 18	0.000 60
EARTHQUAKE does not Granger Cause LOD1	12 622/365	1.240 48	0.001 39

表 5　扣除季节性的周期项的日长变化和地震能量的 Granger 因果检验结果

Table 5　The Granger causality test result of the LOD change (seasonal change deduction) and earthquake energy

零假设	观测数/滞后期数	F 统计量	概率
LOD1 does not Granger Cause ENERGY	12 937/50	2.627 50	3.5E−09
ENERGY does not Granger Cause LOD1	12 937/50	1.787 29	0.000 54
LOD1 does not Granger Cause ENERGY	12 892/95	2.367 23	2.2E−12
ENERGY does not Granger Cause LOD1	12 892/95	1.839 98	1.3E−06
LOD1 does not Granger Cause ENERGY	12 867/120	2.776 66	0.000 00
ENERGY does not Granger Cause LOD1	12 867/120	1.971 79	1.6E−09
LOD1 does not Granger Cause ENERGY	12 807/180	2.353 49	0.000 00
ENERGY does not Granger Cause LOD1	12 807/180	1.663 17	7.5E−08
LOD1 does not Granger Cause ENERGY	12 622/365	2.290 52	0.000 00
ENERGY does not Granger Cause LOD1	12 622/365	1.815 27	0.000 00

对地球自转变化产生的角动量变化与地震的关系的基本认识是:或许地球自转变化不足以导致地震的直接产生,但是很有可能是地震的重要触发因素,地震通过地震波的震荡也可能导致地球自转速度的变化[1,8,29]。本文采用更精细的时间序列数据,对地球自转和地震之间的 Granger 因果关系检验得到的结果与前人研究成果基本一致。

3 结论

通过上文对 1973 年以来以日为单位的地球自转变化时间序列和地震时间序列之间的 Granger 因果关系检验可知,地球自转变化与地震之间存在着双向 Granger 因果关系,这从一定程度上佐证了地球自转变化与地震之间可能存在着复杂的动力机制,即地球自转变化可能导致地震发生,地震也会对地球自转变化产生影响。

References:

[1] Du P R, Xu D Y. The Introduction of Astroseismology[M]. Beijing: Seismological Press, 1989: 71-82(in Chinese).

[2] Li Q B, Xiao X H, Li Z S. A primary analysis of the relation between the strong earthquake in China's continent and long term variation of the Earth's rotation rate[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1973, 16(2): 71-80(in Chinese).

[3] Anderson D L. Earthquake and the rotation of the Earth[J]. Science, 1974, doi:10.1126/science.186.4158.49.

[4] An O. Relation between the global strong earthquake activities and the Earth's rotation rate[J]. North China Earthquake Science, 1985, 3(1): 56-67(in Chinese).

[5] Ji H Q, You S R. Relation between the Earth's rotation rate variation and the energy of global shallow and deep earthquake and their mechanical relation[J]. Chinese Astronomy, 1988, 29(4): 326-332(in Chinese).

[6] Zheng D W, Zhou Y H. The study of Earth's rotation and activities of global earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(1): 25-30(in Chinese).

[7] Kamal N, Manshinha L. The triggering of aftershocks by the free oscillation of the Earth[J]. BSSA, 1996, 86(2): 299-305.

[8] Gu Z N. Analyses on the variation of the Earth's rotation rate induced by the earthquake[J]. Astronomical Research & Technology, 1997, 2: 61-67(in Chinese).

[9] Ma Z J, Du P R. Orientational migration of earthquakes and droughts and formation mechanism[J]. Quaternary Sciences, 1999, 19(5): 397-402(in Chinese).

[10] Hu H, Li X M. Analysis of astronomical characteristics of major earthquakes in China[J]. Journal of Natural Disasters, 1999, 8(1): 30-34(in Chinese).

[11] Han Y B, Guo Z J, Zhao J, et al. Variation of the Earth's rotation and large earthquakes in the West of China[J]. Recent Developments in World Seismology, 2003, 6: 1-5(in Chinese).

[12] Fu Z X, Shao H C, Ding X. Relation between distribution of shallow strong earthquake in China's continent and the earth rotation rate variation[J]. Earthquake, 2004, 24(3): 15-20(in Chinese).

[13] Bo W J, Wang G Y. Researches on relations among earth rotation: Fault deformation and seismicity[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26(2): 43-47(in Chinese).

[14] Ma L H, Han Y B, Yin Z Q. Distribution characteristics of global significant earthquakes and possible connection between earthquakes and Earth's variable rotation rate[J]. Astronomical Research & Technology, 2007, 4(4): 406-411(in Chinese).

[15] Han Y B, Ma L H, Zhao H Y, et al. Time variation of inter-decade periodic components of the Earth's rotation rate[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(4): 29-33(in Chinese).

[16] Zhang H W, Xu H Z, Zheng Y, et al. Research for astrogeodynamical effects of the Earth's rotation variation of gravitational potential and gravity[J]. Chinese Journal Geophysics, 2002, 17(3): 424-429(in Chinese).

[17] Hopkin M. Sumatran quake sped up Earth's rotation[J]. Nature, 2004, doi:10.1038/news041229-6.

[18] Gross R S, Chao B F. The rotational and gravitational signature of the December 26, 2004 Sumatran earthquake[J]. Surv Geophys, 2006, 27: 615-632.

[19] Ohta K J, Onoda S Z, Hirose K, et al. The electrical conductivity of post-perovskite in Earth's D″ layer[J]. Science, 2008, 320: 89-91.

[20] Granger C W. Investigating causality relations by economic models and cross spectral methods[J]. Econometrics, 1969, 37: 424-438.

[21] Kaufmann R K, Stern D I. Evidence for human influence on climate from hemispheric temperature relations[J]. Nature, 1997, 388: 39-44.

[22] Wang S, Sun L C, Gan G Z. Application research based on Granger causality test for attack detection[J]. Computer Applications, 2005, 25(6): 1282-1285(in Chinese).

[23] Wang L P, Long Z H. Analysis of testing methods of causality based on the theory of co-integration[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Sciences Edition, 2005,

28(4)：430-434(in Chinese).

[24] Gujarati D N. Econometrics[M]. Beijing：Chinese Renmin University Press，2002：613-615(in Chinese).

[25] Lü L S. The tentative application of the Earth Systems Science to the interpretation of the 2004 Earthquake Tsunami in the Indian Ocean[J]. Acta Geoscientia Sinica，2007，28(2)：209-217(in Chinese).

[26] Ma L H，Han Y B，Liao D C. Study progress of wavelet transform applying in length-of-day change[J]. Progress in Geophysics，2007，22(4)：1075-1079(in Chinese).

[27] Ma L H，Han Y B，Liao D C. 50-day oscillation of length-of-day change[J]. Earth，Moon，and Planets，2008，doi：10.1007/s11038-008-9230-6.

[28] Ding Y R，Wang X Y. The 120-day fluctuation of the Earth rotation：True or false[J]? Journal of Nanjing University：Natural Sciences Edition，1994，30(2)：217-225(in Chinese).

[29] Chao B F，Gross R S. Changes in the Earth's rotation energy induced by earthquakes[J]. Geophys J Int，1995，122：776-783.

参考文献：

[1] 杜品仁，徐道一. 天文地震引论[M]. 北京：地震出版社，1989：71-82.

[2] 李启斌，肖兴华，李致森. 中国大陆强地震与地球自转角速度长期变化关系的初步分析[J]. 地球物理学报，1973，16(2)：71-80.

[4] 安欧. 全球大震活动与地球自转速率的关系[J]. 华北地震科学，1985，3(1)：56-67.

[5] 季洪钦，尤淑如. 地球自转不均匀性与全球中震、深震能量的相关分析及其力学关系[J]. 天文学报，1988，29(4)：326-332.

[6] 郑大伟，周永宏. 地球自转变化与全球地震活动关系的研究[J]. 地震学报，1995，17(1)：25-30.

[8] 顾震年. 地震引起地球自转速率变化的分析[J]. 云南天文台台刊，1997，2：61-67.

[9] 马宗晋，杜品仁. 地震和干旱的定向迁移及其机制[J]. 第四纪研究，1999，19(5)：397-402.

[10] 胡辉，李晓明. 中国大地震的天文特征分析[J]. 自然灾害学报，1999，8(1)：30-34.

[11] 韩延本，郭增建，赵娟，等. 地球自转速率变化与中国西部的大地震[J]. 国际地震动态，2003，6：1-5.

[12] 傅征祥，邵辉成，丁香. 中国大陆浅源强震分布与地球自转速率变化的关系[J]. 地震，2004，24(3)：15-20.

[13] 薄万举，王广余. 地球自转、断层形变与地震活动关系研究[J]. 大地测量与地球动力学，2006，26(2)：43-47.

[14] 马利华，韩延本，尹志强. 全球强震的分布及其与地球自转速率变化的关系[J]. 天文研究与技术(国家天文台台刊)，2007，4(4)：406-411.

[15] 韩延本，马利华，赵海燕，等. 地球自转速率年代际周期分量的时变特性[J]. 自然灾害学报，2003，12(4)：29-33.

[16] 张捍卫，许厚泽，郑勇，等. 地球自转的天文地球动力学效应研究——引力位和重力的变化[J]. 地球物理学报，2002，17(3)：424-429.

[22] 汪生，孙乐昌，干国政. Granger 因果关系检验在攻击检测中的应用研究[J]. 计算机应用，2005，25(6)：1282-1285.

[23] 王立平，龙志和. 基于 Granger 原因的因果关系检验方法评析[J]. 合肥工业大学学报：自然科学版，2005，28(4)：430-434.

[24] Gujarati D N. 计量经济学[M]. 北京：中国人民大学出版社，2002：613-615.

[25] 吕林素. 试用地球系统科学观解读 2004 年印度洋地震海啸[J]. 地球学报，2007，28(2)：209-217.

[26] 马利华，韩延本，廖德春. 小波变换应用于日长变化的研究进展[J]. 地球物理学进展，2007，22(4)：1075-1079.

[28] 丁月蓉，王小亚. 地球自转中的 120 天波动存在吗[J]? 南京大学学报：自然科学版，1994，30(2)：217-225.